

*Демиденко Е.В., Кузьмин С.В., Кирик Д.И.
Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

3D печать антенно-фидерных устройств с использованием полимерных материалов

Развитие технологий 3D печати позволяет применить их для изготовления устройств СВЧ диапазона не только традиционным образом (для печати несущих конструкций) но и для создания специализированных материалов, что, в свою очередь, позволяет изготавливать конструкцию и, непосредственно, функциональную часть, в едином технологическом цикле. Применяемые для печати диэлектрики обладают достаточно малыми потерями (тангенс угла диэлектрических потерь порядка 10^{-3}) и могут иметь диэлектрическую проницаемость, варьируемую в зависимости от состава материала. Совершенствование технологий 3D печати и ряд очевидных технологических преимуществ делают актуальным развитие технологического направления, связанного с СВЧ техникой, с перспективой создания специализированных принтеров для изготовления СВЧ устройств, антенн и композитных материалов с различными электрическими характеристиками.

Ключевые слова: СВЧ устройства, материалы, 3D печать.

Распространение устройств СВЧ-диапазона стало массовым не только в аппаратуре для специальных применений, но и в бытовой радиоэлектронной аппаратуре. Отсюда возникла потребность удешевления устройств, в том числе, за счёт использования новых для СВЧ-техники технологий. Например, штамповка антенн, вместо традиционной технологии печатных плат.

При крупносерийном производстве хорошо зарекомендовала себя LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) технология [1], отличительной особенностью которой, по сравнению с многослойными печатными платами, является то, что диэлектрическим материалом выступает низкотемпературная керамика с минимальными потерями, которая на конечном этапе спекается при температуре ниже 1000°C .

В качестве ещё одной новой технологии рассматривается 3D печать [2], которая может позволить производить недорогие устройства как при малых сериях, так и при создании макетов и опытных образцов.

Аддитивное производство (3D печать), включает в себя технологии по созданию объектов за счёт нанесения последовательных слоев материала, воссоздающих очертание модели на основе цифрового 3D образца. Существует масса способов создания объектов аддитивного производства, отличающихся как принципами нанесения, так и материалами формирования объектов. Основные методы представлены в таблице 1 [3].

Таблица 1. Методы 3D печати

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF ₃)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

Наиболее распространённой и доступной технологией 3D печати является FDM (англ. *Fused deposition modeling*) – моделирование послойного наплавления термопластичными материалами. Процесс создания начинается с обработки цифровой 3D модели, программа делит модель на слои и при необходимости генерирует поддерживающие структуры. Далее изделие формируется путем выдавливания («экструзией») расплавленного термопластика или других композитных материалов из последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования. Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия. Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла наоборот охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала. Ассортимент материалов для FDM печати является самым широким среди других доступных технологий. Для печати используют, как правило, термопластики, либо композитные материалы, содержащие различные добавки. Самыми распространенными

являются ABS и PLA пластики. Для проведения исследований был выбран Акрилонитрилбутадиенстирол (ABS). Характеристики данного материала представлены в таблице 2 [4].

Таблица 2. Основные характеристики ABS пластика

Характеристика	Значение
Плотность, г/см ³	1,02–1,06
Предел текучести при растяжении, МПа	26–47
Модуль упругости при растяжении, МПа	1700–2930
Относительное удлинение при растяжении, %	6–100
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	52–95
Модуль упругости при изгибе, МПа	1700–3000
Твердость при вдавливании, МПа	70–125
Твердость по Роквеллу	R80–R116
Коэфф. линейного термического расширения, 1/°С	(0,5–1,1)·10 ⁻⁴
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,2
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	10 ¹³ –10 ¹⁶
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	10 ¹ –10 ¹⁶
Диэлектрическая проницаемость (при 100 Гц)	2,7–3,5
Диэлектрическая проницаемость (при 1 МГц)	2,6–3,2
Тангенс угла диэлектрических потерь (при 100 Гц)	0,005–0,015
Тангенс угла диэлектрических потерь (при 1 МГц)	0,007–0,015
Водопоглощение (равновесное, при погружении), %	0,3–1,8

В промышленности пластик уже имеет широкое применение, из него изготавливают детали автомобилей, корпуса крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры. ABS пластик пригоден для нанесения гальванического покрытия и даже металлизации (некоторые марки), а также для пайки контактов. Стоек к спиртам, воде, растворам солей, маслам, кислотам, не подвержен влиянию микроорганизмов и грибкам. Некоторые разновидности ABS пластика разрушаются при попадании ультрафиолетовых лучей, что требует дополнительной защиты.

Для применения ABS пластика в СВЧ-устройствах и антеннах, где распространятся электромагнитные волны, необходимо найти значения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Существует несколько методов измерения данных характеристик, которые варьируются в зависимости от форм и принципов построения резонаторов, частотных диапазонов измерения. Для проведения измерений был выбран метод металлодиэлектрического резонатора (ГОСТ Р 8.623–2006). Конструкция и аналитические выражения для расчёта характеристик описаны в [5].

Определение относительной диэлектрической проницаемости ϵ заключается в измерении резонансной частоты колебания, возбуждаемого в металлодиэлектрическом резонаторе. Определение тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ заключается в измерении собственной добротности резонатора, и добротности резонатора с образцом.

Для измерения параметров пластика, прошедшего экструзию через сопло принтера, было напечатано 9 образцов цилиндрической формы с диаметром 3 мм и длиной 150 мм. Для создания данных образцов была разработана 3D модель, в которой было учтено то, что данные образцы будут создаваться в вертикальном направлении, и для уменьшения отклонений при печати, необходимо сформировать конструкцию поддержки. Пример данной модели показан на рисунке 1а.

Следующим этапом стала подготовка модели к 3D печати – проведения слайсинга. На этой стадии модель разбивается на множество двумерных слоев из которых складывается физический объект. Здесь заедается толщина и ширина каждого слоя указывается уровень заполнения пластиком пространства модели. Результаты слайсинга показаны на рисунке 1б. Далее генерируется программный код для управления 3D принтером.

Результаты измерений напечатанных образцов и исходного пластика приведены в таблице 3. Для сравнения показаны характеристики серийного ламината, применяемого для производства СВЧ-устройств и антенн [6].

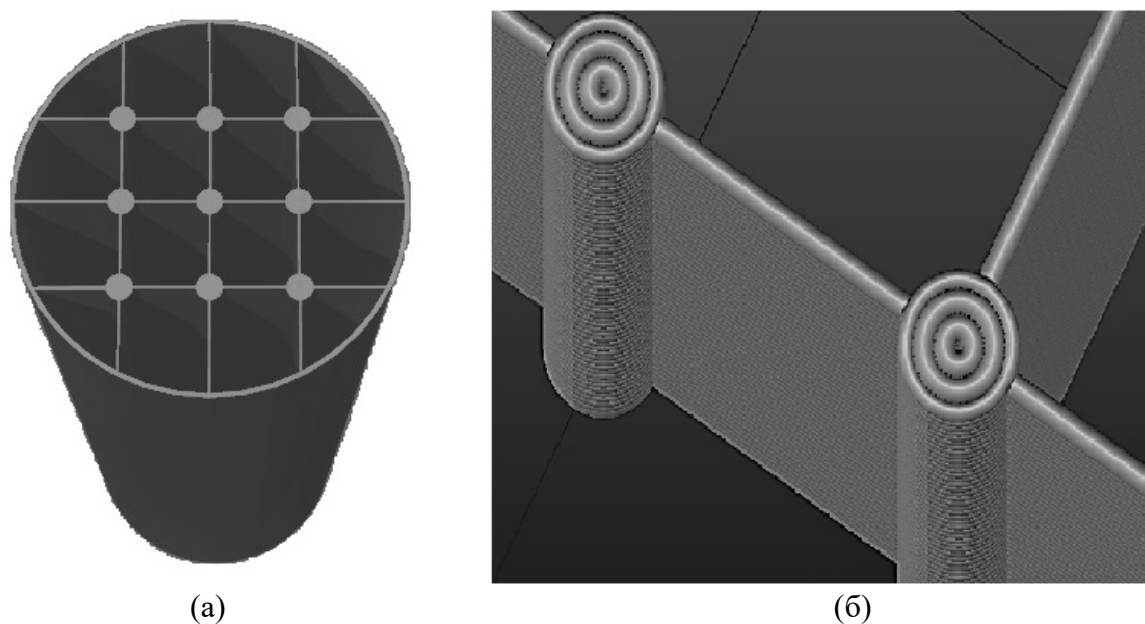


Рис. 1. 3D модель образцов
(а) с поддержкой, (б) послойный вид

Таблица 3. Характеристики ABS пластика
(резонансная частота ненагруженного резонатора 2,4917 ГГц)

Образец №	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь $\cdot 10^{-3}$
Исходный материал	2.56	4.3
1	2.43	4.1
2	2.43	4.1
3	2.43	4.1
4	2.47	4.2
5	2.45	4.2
6	2.41	4.1
7	2.49	4.2
8	2.47	4.1
9	2.47	4.1
Nelco NX9245	2.45	1.6

Расхождения в значениях для разных образцов могли быть вызваны неполной заливкой измеряемых образцов, из-за которой между слоями образуются воздушные зазоры. При проектировании антенно-фидерных устройств на основе ABS пластика

предлагается использовать следующие значения: диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2.45$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 4.15 \cdot 10^{-3}$.

На рисунке 2 показан макетный образец наконечника радиопрозрачного укрытия. Для обеспечения жёсткости конструкции с внутренней стороны сформирована сотовая структура.

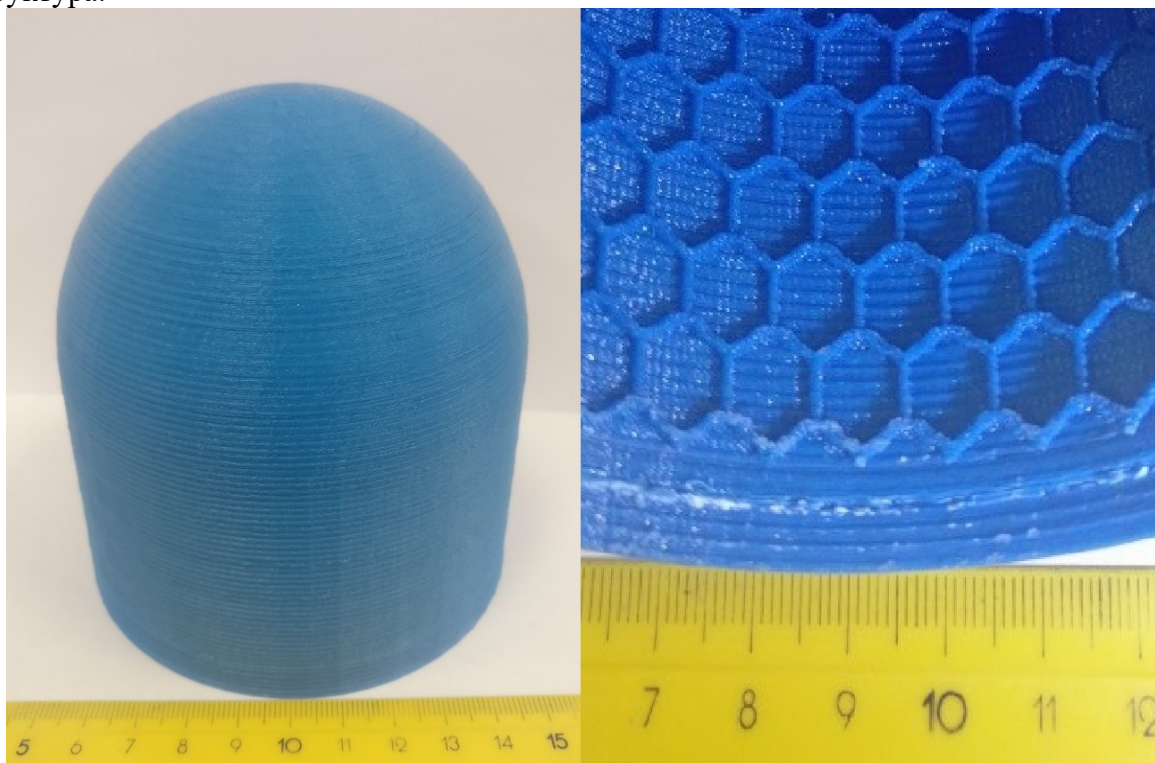


Рис. 2. Наконечник радиопрозрачного укрытия

Проведённое исследование показало, что ABS пластик может использоваться для производства СВЧ-устройств и антенн. Дальнейшее развитие технологии может позволить создавать высокочастотные композитные материалы, имеющие в своем составе керамические и другие примеси, в том числе, позволяющие печатать металлизированные слои. Появление высокоточных 3D принтеров увеличит плотность печати и уменьшит воздушные зазоры. Есть надежда, что в конечном итоге технология 3D печати позволит создавать законченное изделие СВЧ-диапазона в едином технологическом цикле.

Библиографический список

1. Закирова Э.А. Исследование печатных плат с многослойными диэлектрическими подложками и разработка микрополосковых СВЧ устройств на их основе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: Москва, 2014, стр. 34.
2. Elsallal M.W., Hood J., McMichael I. 3D Printed Material Characterization for Complex Phased and Metamaterials. October 14, 2016- P.1-7.
3. http://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/ (дата обращения 25.01.2018)
4. Куликов Г. Г., Кружков В. Н., Дронь Е. А., Колесников А. А., Кружков О. Н., Шарипова А. М. Введение в информационные системы цифрового моделирования: учеб. пособие: РИК УГАТУ, 2016. стр 75-77
5. Shine L, Cevdet A, Renato G. Precise Calculations and Measurements on the Complex Dielectric Constant of Lossy Materials Using TM₀₁₀ Cavity Perturbation Techniques// IEEE Transaction on microwave theory and techniques VOL. MTT-29, No.10, October 1981- P.1-3.
6. <https://parkelectro.com/products/nh9000/> (дата обращения 25.01.2018)